中国生态农业学报 2017 年 5 月 第 25 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2017, 25(5): 656−664



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160843

任志远, 孙艺杰, 吴林筱. 1990—2012 年榆林市土地生态风险综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 656−664
Ren Z Y, Sun Y J, Wu L X. Comprehensive evaluation of ecological risk of land during 1990–2012 in Yulin City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 656−664

# 1990—2012 年榆林市土地生态风险综合评价*

任志远, 孙艺杰, 吴林筱

(陕西师范大学旅游与环境学院/陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心 西安 710119)

**摘 要:** 土地利用/覆盖变化对区域生态安全和维持生态系统服务功能起着决定性作用, 土地生态风险评价是衡量土地资源可持续利用的重要指标。本文以生态脆弱的陕西省榆林市为研究对象, 依据榆林市土地系统的基本特征, 选取表征干旱风险的降水距平百分率指数、表征人类活动类型及强度的土地利用结构风险及表征土壤侵蚀的土壤水力侵蚀、土壤风力侵蚀 4 个风险指标, 构建土地生态风险综合评价模型, 对影响榆林市 1990—2010 年土地生态风险的因素进行定性和定量的评价与分析。研究结果表明: (1)1990—2012 年榆林市的降水距平百分率指数均值呈先减后增的趋势, 其低值区主要分布在偏东部地区; (2)21 年间土地利用结构生态风险整体上呈先增后减的趋势, 区域差异较大且变化明显; (3)土壤水力侵蚀较剧烈的区域主要分布在东部及南部地区, 21 年间均值呈先增后减的趋势; (4)土壤风力侵蚀较严重的区域主要分布在北部地区, 随着时间变化其均值一直呈递减趋势; (5)土地生态风险 21 年间总体呈减小趋势, 各区县生态风险差异显著。通过对榆林市土地生态风险综合评价, 可为优化土地资源配置、保护生态环境提供理论建议, 实现区域经济生态和谐发展。

**关键词:** 土地; 生态风险; 生态脆弱; 能源开发; 榆林市
**中图分类号:** X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)05-0656-09

# Comprehensive evaluation of ecological risk of land during 1990–2012 in Yulin City*

REN Zhiyuan, SUN Yijie, WU Linxiao

(School of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University / National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Land use/cover change is a determinant factor in the analysis of ecosystem services for regional ecological security and maintenance. Ecological risks of land serves as a vital index in measuring sustainable utilization of land resources. The research area used in this study was Yulin City, a city in northern Shaanxi Province located in the Loess Plateau and Maowusu Desert border where the climate is arid and the land use structure is irrational. This region is one of the areas with the most severe water and soil erosion on the Loess Plateau, with ecologically-fragile environment, damage susceptibility and recovery difficulty. Thus based on the natural geographical conditions, development history of the city, basic land system characteristics and removed single factor evaluation uncertainty, this study established an evaluation index system of various sources risk in Yulin City. Percent precipitation anomaly index was used as indicator for the risk of drought, the risk of land use structure as the indicator for the effect of human activity on the ecological system, and wind/water erosion as the indicators of soil erosion. Then the four evaluation indicators were used to construct a comprehensive evaluation model for the qualitative and quantitative evaluation and analysis of the factors affecting ecological risk of land in Yulin City for the period 1990–2010. The main

* 国家自然科学基金项目(41371523)和教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004)资助
任志远, 主要从事国土资源开发与生态环境评价相关研究。E-mail: renzhy@snnu.edu.cn
收稿日期: 2016-09-19 接受日期: 2016-12-29

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371523) and the Major Project of Key Research Institute of Humanities and Social Science of the Ministry of Education of China (14JJD840004).
Corresponding author, REN Zhiyuan, E-mail: renzhy@snnu.edu.cn
Received Sep. 19, 2016; accepted Dec. 29, 2016

conclusions of the study were as follows: (1) the distribution of precipitation was uneven, with percent precipitation anomaly index initially decreasing and later increasing in the period from 1990 to 2012 for Yulin City. The area with lower value of the index mainly covered the eastern part of the city. And the index increased from the south to the north. (2) There were large and significant changes in the differences in regional risks of land use structure. The land use structure risk first increased and then decreased in the course of the investigated 21-year period. (3) More severe soil water erosion occurred mainly in the eastern and the southern regions of the study area (driven mainly by topographic factors) with an initial mean increase and then a decrease over the 1990–2012 period. (4) There was more severe wind erosion mainly in the northern region, with Yuyang District having the largest erosion and Suide and Mizhi Counties the smallest erosion, and with a decreasing trend in mean erosion for the investigated period. (5) The trend in ecological risk of land was decreased, and significant differences in ecological risk of land were observed among counties. The area of Yulin City with severe ecological risk in 1990 was mainly in the northwest, area with high ecological risk in 2001 was mainly in the central region and west of Yulin City (e.g., Dingbian County), area with moderate ecological risk was mainly in the southeast. The ecological security status in the study area was improved overall, although the situation remained grim. This research put forth a theoretical proposal for optimizing the allocation of land resources and protecting the ecological environment in order to realize a harmonious development of regional economy and ecology.
**Keywords:** Land; Ecological risk; Fragile ecology; Energy development; Yulin City



近年来，随着人口增长和社会经济的快速发展，人类的社会经济活动导致自然资源的高速耗减和环境质量下降，由此产生了一系列生态环境问题，严重威胁着人类的生存和发展。人类该如何维护自身的安全成为人们关注的焦点，生态风险评价也越来越得到国内外的关注[1-6]。有些学者以土地利用数据为基础，构建生态风险指数模型，对区域生态风险进行了综合评价[7-10]；也有学者运用景观生态学原理对区域生态风险进行评价[11-13]；张晓媛等[14]基于 PSR 模型构建风险源、风险受体和风险响应评价指标体系，利用综合模糊评价法对三峡库区屏障带重庆段土地利用生态风险进行综合评价；张思锋等[15]运用生态梯度风险评价法，通过定性、半定量、定量 3 个层次对榆林煤炭开采区的生态风险进行评价。

生态风险的研究最早主要是针对特定小区域化学污染物的生态风险评价[16-18]，随着经济发展、人地关系矛盾突出，土地生态风险评价逐渐兴起，国内学者结合土地利用类型和景观因子，建立了数学评价模型和基于景观尺度的生态风险框架对土地生态风险进行评价。但目前对于土地生态风险评价指标较为单一，多局限于土地利用变化，较少涉及区域自然地理条件及与人类活动相关的多种自然、社会风险，对于单一生态风险评价较为成熟，缺乏在土地生态系统结构、组分、功能的相互作用基础上的环境效应表征，关于区域土地生态风险综合评价的定量化和空间表达仍处于探索阶段。

本文以我国典型生态脆弱区和能源开发区——陕西省榆林市为主要研究对象，依据其自然地理条件和城镇发展状况，多方面综合考虑榆林市生态环境特征，去除单一要素评价的不确定性，建立多种风险源的评价指标，选取表征干旱情况的降水距平百分率指数作为干旱风险评价指标，以土地利用结构风险作为土地生态安全系统自身安全性的评价指标，在榆林市北部风沙草滩区、南部黄土高原区分别选取风力侵蚀和水力侵蚀作为表征土壤侵蚀的生态风险指标，在此基础上构建生态风险综合评价模型，定量评价 1990—2012 年榆林市土地生态风险，揭示榆林市各区县土地生态风险的空间差异及其时间变化过程。

## 1　研究区概况

榆林市位于陕西省北端，黄河中游西岸，地处 107°14′51″E~111°14′31″E，36°48′58″N~39°35′07″N，土地总面积 42 920.18 km$^2$。地势西北高、东南低，地貌类型以古长城为界，北部为风沙草滩区，南部为黄土丘陵沟壑区。该地区夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，年均温 7~13 ℃，气温日较差较大，年均降水量约 400 mm 左右，季节性差异明显。榆林市是我国主要的能源基地，全市矿产资源极其丰富，被誉为“中国的科威特”。2013 年全市总人口 376.99 万人，生产总值(GDP)2 846.75 亿元，工业总产值 1 943.56 亿元，占 GDP 的 68.2%。

## 2　数据来源与研究方法

### 2.1　数据来源

本文主要数据包括：1)1990 年、2001 年、2012 年土地利用数据，来源于中国科学院资源环境数据中心、地球系统科学数据共享平台、中国西部环境

与生态科学数据中心以及野外土地调查数据；2)气象数据主要来源于中国气象科学数据共享服务网；3)DEM 数据来源于中国科学院数据应用环境中心；4)道路交通、水系、行政边界等其他数据，来自于国家基础地理数据库。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 评价指标选取

土地生态风险评价是衡量土地资源可持续利用的重要指标，产生土地生态风险的因素主要有自然因素和人文因素，榆林市自然灾害主要有旱灾、霜冻、暴雨、大风、冰雹等，其中尤以旱灾危害最为严重，因此在自然因素方面，选取表征干旱情况的降水距平百分率指数作为风险评价指标。人文因素主要有人口城镇化、能源开发、开荒造田、森林砍伐等对生态系统产生的间接影响，土地作为人类活动的载体，其类型、结构变化最能反映人类活动的类型及强度，因此选取土地结构变化这一指标来表征人类社会活动对生态系统产生的风险。此外，由于榆林市脆弱的自然环境及人类活动的干扰，使其土壤侵蚀较为严重，而榆林市北部为风沙草滩区，主要为风力侵蚀，南部为黄土高原区，主要为水力侵蚀，因此选取表征土壤侵蚀的风力侵蚀和水力侵蚀作为生态风险评价指标。

### 2.2.2 评价指标计算方法

**1)降水距平百分率指数**

降水距平百分率指数($P_a$)反映了某一时段的降水量与同期平均降水状态的偏离程度，其计算模型[19]为：

$$P_a = \frac{P-\bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \tag{1}$$

式中：$P$ 为某一时段的降水量；$\bar{P}$ 为多年平均降水量，本文中 $\bar{P}$ 取 1980—2010 年 30 年的平均降水量。降水距平百分率指数是表征干旱状况的指标，其值越大表示某一时期的降水量高于平均值越高，负距平表示降水量低于平均值。

基于 ArcGIS 采用空间插值法[20]得到连续的降水量空间数据，为了保证插值的准确性，选取榆林市周边宁夏、山西、陕西、甘肃、内蒙的 58 个站点作为插值点，生成 1990 年、2001 年、2012 年的降水数据和 1980—2012 多年平均降水数据，将 3 年的降水图层分别与 1980—2012 多年平均降水图层进行栅格计算。

**2)土地利用结构生态风险强度指数**

土地利用结构及其变化在一定程度上可以间接反映土地生态风险状态，本文借鉴已有的研究成果，采用的土地利用结构生态风险模型[9]如下：

$$\mathrm{ERI} = \sum_{i=1}^{n} \frac{B_i \times W_i}{B} \tag{2}$$

式中：ERI 为土地利用结构生态风险强度指数；$B_i$ 为 $i$ 种地类的面积；$B$ 为总面积；$W_i$ 为第 $i$ 种地类的生态风险权重。

借鉴臧淑英、马彩虹等[7,10]的研究成果采用层次分析法对各地类进行赋权，其结果见表 1。以榆林市土地利用数据为基础，根据土地利用结构风险模型计算各区县土地利用结构生态风险指数。

**表 1 土地利用结构风险评价中不同土地利用类型的权重**

Table 1 Weights of different land use types in the evaluation of ecological risk of land use structure

| 土地利用类型 Land use type | 耕地 Cropland | 林地 Forest land | 草地 Grass land | 水域 Water body | 建设用地 Construction land | 未利用地 Unused land |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 生态风险权重 Ecological risk weight | 0.220 5 | 0.035 8 | 0.059 7 | 0.075 2 | 0.467 6 | 0.141 2 |

**3)土壤水力侵蚀量**

土壤水力侵蚀估算模型中，目前应用最广泛的两个模型为土壤流失通用方程(USLE)和 RUSLE 模型，后者是在前者修正后的基础上得到的，其对 USLE 中的一些因子做了进一步的分解，估算更为科学、精确，因此本文采用 RUSLE 模型对土壤水力侵蚀量进行估算。其模型基本公式为[21]：

$$A_m = R \times K \times C \times \mathrm{LS} \times P \tag{3}$$

式中：$A_m$ 为研究区域土壤实际的侵蚀量，单位为 $\mathrm{t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}}$；$R$ 为降水-径流因子，用多年平均年降水侵蚀力指数表示，单位为 $\mathrm{MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}}$；$K$ 为土壤可侵蚀性因子，单位为 $\mathrm{t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}}$；$C$ 为覆盖与管理因子；LS 为坡长坡度因子；$P$ 为土壤保持措施因子。$C$、LS、$P$ 均为无量纲因子。

**4)土壤风力侵蚀量**

针对不同时空尺度的土壤风力侵蚀情况，出现了 WEQ 模型、WEPS 模型、日风沙侵蚀量模型等，但大多数模型都难以估算长时间的累积侵蚀量。董治宝等[22-23]根据我国的实际情况，建立了年尺度的区域土壤风力侵蚀估算模型，其表达式为：

$$Q=\iiint_{t,x,y}\left[3.91\left(1.041\,3+0.044\,1\theta+0.002\,1\theta^2-0.000\,1\theta^3\right)^{V^2\times\left(8.2\times10^{-5}\right)^{\mathrm{VCR}}\times\mathrm{SDR}^2}/H^8d^2F^{x,y,t}\right]dxdydt \quad (4)$$

式中: $Q$ 为土壤风力侵蚀量, t; $V$ 为风速, $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$; $H$ 为空气相对湿度, %; VCR 为植被覆盖度, %; SDR 为人为地表结构破损率, %; $d$ 为颗粒平均粒径, mm; $F$ 为土体硬度, $\mathrm{N\cdot cm^{-2}}$; $\theta$ 为坡度, °; $x$, $y$ 表示距离参照点的距离, km; $t$ 为时间, s。

5)土地生态风险综合指数

在参考大量文献以及结合榆林市实际情况的基础上[24-26], 通过构建生态风险综合指数对榆林市生态风险进行评价, 其模型如下:

$$E=\sum_{i=1}^{n}\left(W_i\times P_i\right) \quad (5)$$

式中: $E$ 为土地生态风险综合指数; $W_i$ 为单项风险权重; $P_i$ 为单项生态风险评价值。其中 $W_i$ 是各评价指标的权重值, 本文采用定性和定量相结合的层次分析法, 结合 Yaahp 软件确定各生态风险指标的权重(表 2)。根据土地生态风险综合指数模型计算得到区域的土地生态风险综合指数, 结合已有研究, 将土地生态风险划分为 5 个等级, 其划分标准如表 3 所示。

表 2　土地生态风险综合评价中各分类生态风险的权重
Table 2　Weights of different kinds of ecological risks in the comprehensive evaluation of land ecological risk

| 风险 Ecological risk | 干旱风险 Drought risk | 土地利用结构风险 Land use structure risk | 水土流失风险 Water erosion risk | 风沙侵蚀风险 Wind erosion risk |
|---|---|---|---|---|
| 权重 Weight | 0.122 2 | 0.423 0 | 0.227 4 | 0.227 4 |

表 3　土地生态风险等级划分标准
Table 3　Classification standards of land ecological risk

| 等级 Class | I | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|---|
| 生态风险指数 Ecological risk index | ≤0.25 | 0.25~0.35 | 0.35~0.45 | 0.45~0.55 | >0.55 |
| 风险状态 Risk state | 很小 Tiny | 较小 Less | 稍小 Small | 较大 Larger | 很大 Great |

## 3　结果与分析

### 3.1　干旱风险评价

通过计算得到 1990 年、2001 年和 2012 年的降水距平百分率指数分布图(图 1), 为了进一步定量化分析, 以县域为行政单元, 进行分区统计, 得到各区县的降水距平百分率指数(表 4)。由表 4 和图 1 可知: 榆林市 1990 年的降水距平百分率指数低值区主要分布在东北部, 高值区主要分布在南部, 其中低值中心达–0.15%, 高值中心为 29.52%, 大致呈现由北向南的递增趋势。各区县中, 府谷县、神木县距平值较低, 而清涧县最高。整个年份大部分地区均为正值, 表明其降水量在均值以上, 但高值和低值差异较大, 说明榆林市各区县降水分布不均衡, 表现为南多北少。2001 年的降水距平百分率指数低值区主要分布在东部, 高值区主要分布在中部和西部, 大致呈现自东向西递增的趋势, 其中距平指数最低的是府谷县, 最高值为榆阳区。该年份低值中心达–16.96%, 相比 1990 年明显降低, 说明 2001 年降水量减少, 干旱程度加剧。但高值中心为 48.31%, 高

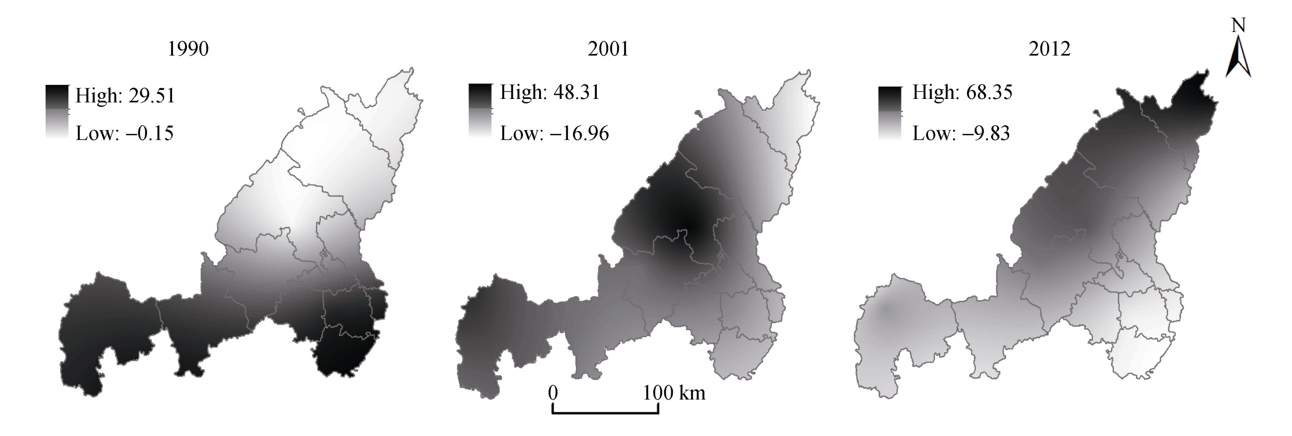



图 1　1990 年、2001 年和 2012 年榆林市降水距平百分率指数(%)分布图
Fig. 1　Distribution of precipitation anomaly percentage index (%) of Yulin City in 1990, 2001 and 2012

值与低值差距增大，说明降水分布不均衡加剧，可能同时发生旱涝；2012 年的降水距平百分率指数低值区主要分布在东南部，高值区主要分布在东北部，大致呈现由南向北递增的趋势，其中距平指数较低的为清涧县，较高的为府谷县。与 1990 年、2001 年相比，其降水距平指数值整体增加，说明 2012 年的降水量明显增加，高值与低值差异明显，降水分布仍然不均衡。

表 4　1990 年、2001 年和 2012 年榆林市各区县降水距平百分率指数

Table 4　Precipitation anomaly percentage index of each county (district) of Yulin City in 1990, 2001 and 2012 %

| 区县 County (district) | 1990 | 2001 | 2012 |
|---|---|---|---|
| 米脂县 Mizhi County | 16.23 | 18.35 | 23.87 |
| 绥德县 Suide County | 24.57 | 7.95 | 13.57 |
| 靖边县 Jingbian County | 21.73 | 16.71 | 25.36 |
| 榆阳区 Yuyang District | 3.52 | 35.13 | 44.98 |
| 佳县 Jiaxian County | 11.09 | 17.03 | 27.57 |
| 府谷县 Fugu County | 1.22 | –8.24 | 55.97 |
| 神木县 Shenmu County | 1.62 | 12.44 | 44.84 |
| 定边县 Dingbian County | 23.72 | 26.49 | 24.38 |
| 子州县 Zizhou County | 21.63 | 14.43 | 20.53 |
| 清涧县 Qingjian County | 28.10 | 2.49 | 11.27 |
| 吴堡县 Wubao County | 24.13 | 2.47 | 13.05 |
| 横山县 Hengshan County | 13.58 | 23.81 | 35.03 |
| 均值 Mean | 15.93 | 14.09 | 28.37 |

### 3.2　土地利用结构风险评价

由表 5 可知：1990 年土地利用结构风险指数最大的是府谷县，最小的是绥德县。土地利用生态风险较大的县域主要分布在北部，其中包括府谷县、神木县、榆阳区，而位于东南部的佳县、米脂县、吴堡县、绥德县和子洲县土地利用结构生态风险较小。产生这一分布的原因主要与北部各县耕地、未利用地所占比重较大，而生态性用地林地、草地、水域所占比重较小有关。2001 年土地利用结构生态风险整体分布发生明显变化，土地利用结构风险指数最大的是米脂县，最小的是神木县，生态风险较 1990 年明显加剧，这主要由于城市迅速扩张，建设用地比重增加，其中子洲县、米脂县、绥德县、佳县和吴堡县生态风险显著加剧，主要与其各地类转移，且耕地面积所占比重明显增加有关。2012 年土地利用结构生态风险较大的县域主要分布在南部，其中指数最大的是吴堡县，最小的是榆阳区。从土地利用结构风险指数变化来看，1990—2001 年，土地利用结构风险指数减少的有府谷县、靖边县、神木县、榆阳区，其余各县风险指数均有所增加；2001—2012 年，土地利用结构风险指数增加的有府谷县、米脂县、绥德县、清涧县、吴堡县，其余各县的风险指数均有所减少；从总体来看，1990—2012 年，榆阳区、神木县、靖边县的土地利用结构风险指数一直处于减少趋势，米脂县、清涧县、绥德县、吴堡县的土地利用结构风险指数一直处于增加趋势。

表 5　1990 年、2001 年和 2012 年榆林市土地利用结构风险指数及其变化

Table 5　Risk indexes and changes of land use structure in different counties (district) in Yulin City in 1990, 2001 and 2012

| 区县 County (district) | 土地利用结构风险指数 Land use structure risk index | | | 土地利用结构风险指数变化 Change of land use structure risk index | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1990 | 2001 | 2012 | 1990—2001 | 2001—2012 | 1990—2012 |
| 定边县 Dingbian County | 0.122 6 | 0.139 5 | 0.131 7 | 0.016 9 | –0.007 9 | 0.009 0 |
| 府谷县 Fugu County | 0.158 7 | 0.117 1 | 0.121 3 | –0.041 6 | 0.004 2 | –0.037 4 |
| 横山县 Hengshan County | 0.116 1 | 0.146 3 | 0.116 1 | 0.030 2 | –0.030 2 | 0.000 1 |
| 佳县 Jiaxian County | 0.102 4 | 0.154 5 | 0.150 7 | 0.052 1 | –0.003 8 | 0.048 3 |
| 靖边县 Jingbian County | 0.132 0 | 0.127 1 | 0.110 4 | –0.004 8 | –0.016 7 | –0.021 6 |
| 米脂县 Mizhi County | 0.097 2 | 0.159 0 | 0.160 8 | 0.061 8 | 0.001 9 | 0.063 7 |
| 清涧县 Qingjian County | 0.117 3 | 0.126 6 | 0.141 8 | 0.009 4 | 0.015 2 | 0.024 5 |
| 神木县 Shenmu County | 0.146 5 | 0.114 6 | 0.092 6 | –0.031 9 | –0.022 0 | –0.053 9 |
| 绥德县 Suide County | 0.089 0 | 0.149 2 | 0.162 8 | 0.060 2 | 0.013 6 | 0.073 8 |
| 吴堡县 Wubao County | 0.105 5 | 0.148 1 | 0.173 3 | 0.042 7 | 0.025 2 | 0.067 8 |
| 榆阳区 Yuyang District | 0.141 6 | 0.123 9 | 0.086 5 | –0.017 7 | –0.037 4 | –0.055 1 |
| 子洲县 Zizhou County | 0.105 9 | 0.145 7 | 0.133 2 | 0.039 8 | –0.012 5 | 0.027 3 |

### 3.3　土壤水力侵蚀评价

根据土壤水力侵蚀模型将所获取的各因子图层进行栅格叠加计算，得到榆林市 1990 年、2001 年和 2012 年的土壤水力侵蚀强度图(图 2)。从图 2 可知，侵蚀严重的地区主要分布在榆林市东北部及中南部，东北部处于水蚀-风蚀交错区，中南部地形复杂，坡

度大，土壤侵蚀严重。从时间变化看，1990 年榆林市东南部地区土壤水力侵蚀较严重，其最高侵蚀量达 1 692.49 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，平均侵蚀量约 147.06 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，其中侵蚀量最大的为清涧县，侵蚀量最小的为定边县；2001 年榆林市东部及南部土壤水力侵蚀均较严重，其最高侵蚀量达 3 711.99 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，平均侵蚀量约为 296.65 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，其中府谷县侵蚀强度最大，榆阳区侵蚀量最小；2012 年榆林市南部土壤水力侵蚀较严重，其最高侵蚀量达 3 076.8 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，平均侵蚀量约为 181.10 $t·hm^{-2}·a^{-1}$，其中清涧县侵蚀强度最大，榆阳区侵蚀强度最小。将 1990 年、2001 年和 2012 年土壤水力侵蚀强度进行比较，侵蚀强度 2001 年>2012 年>1990 年。1990—2001 年土壤侵蚀强度明显加剧，其中府谷县、靖边县、定边县最为明显；到 2012 年，各县土壤水力侵蚀强度有所减缓，变化最为显著的是府谷县、神木县、定边县；总体来看，1990—2012 年神木县、府谷县、吴堡县、佳县的土壤水力侵蚀强度有所缓和，其余各县的土壤水力侵蚀强度均呈现不同程度的加剧，其中清涧县、靖边县和子洲县最为显著。

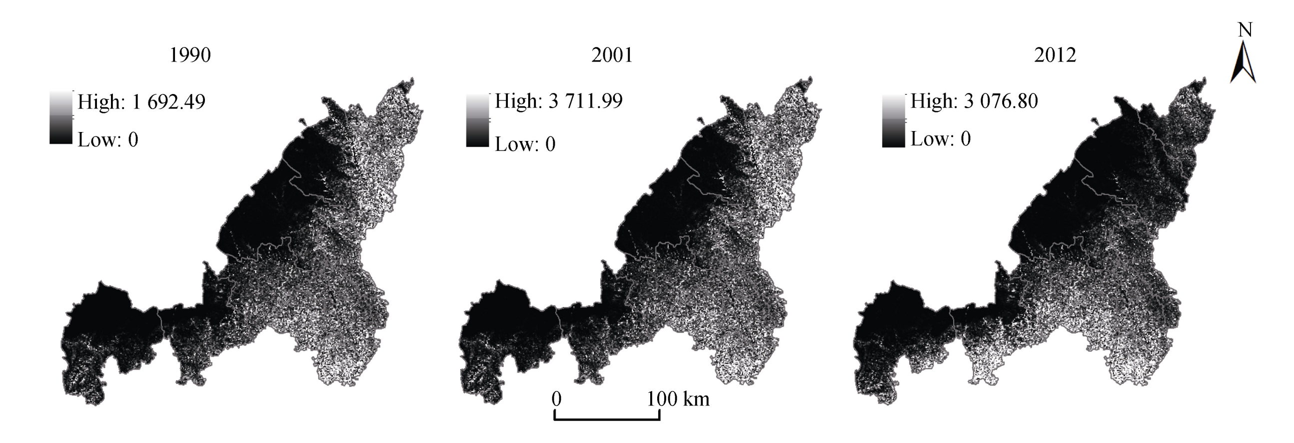



**图 2　1990 年、2001 年和 2012 年榆林市土壤水力侵蚀强度($t·hm^{-2}·a^{-1}$)分布图**

Fig. 2　Distribution of soil erosion intensities ($t·hm^{-2}·a^{-1}$) of Yulin City in 1990, 2001 and 2012

### 3.4　土壤风力侵蚀评价

根据土壤风力侵蚀模型将所获取的各因子图层进行栅格叠加计算，最终得到榆林市 1990 年、2001 年和 2012 年的土壤风力侵蚀强度图(图 3)。如图 3 所示，1990 年榆林市西部及北部地区风力侵蚀较严重，其最高侵蚀量达 128.83 $t·km^{-2}$，平均侵蚀量约为 22.91 $t·km^{-2}$，其中榆阳区和定边县侵蚀量最大，绥德县和清涧县侵蚀量最小；2001 年榆林市北部地区风力侵蚀仍较为严重，其最高侵蚀量达 130.398 $t·km^{-2}$，平均侵蚀量约为 2.82 $t·km^{-2}$，榆阳区和神木县侵蚀量最大，绥德县和米脂县侵蚀量最小；2012 年榆林市北部地区风力侵蚀较严重，其最高侵蚀量达 52.12 $t·km^{-2}$，平均侵蚀量约为 0.70 $t·km^{-2}$，其中榆阳区侵蚀量最大，其次为神木县，米脂县和绥德县侵蚀量最小。将 1990 年、2001 年和 2012 年土壤风力侵蚀强度进行比较，侵蚀强度 1990 年>2001 年>2012 年。从侵蚀强度分布图

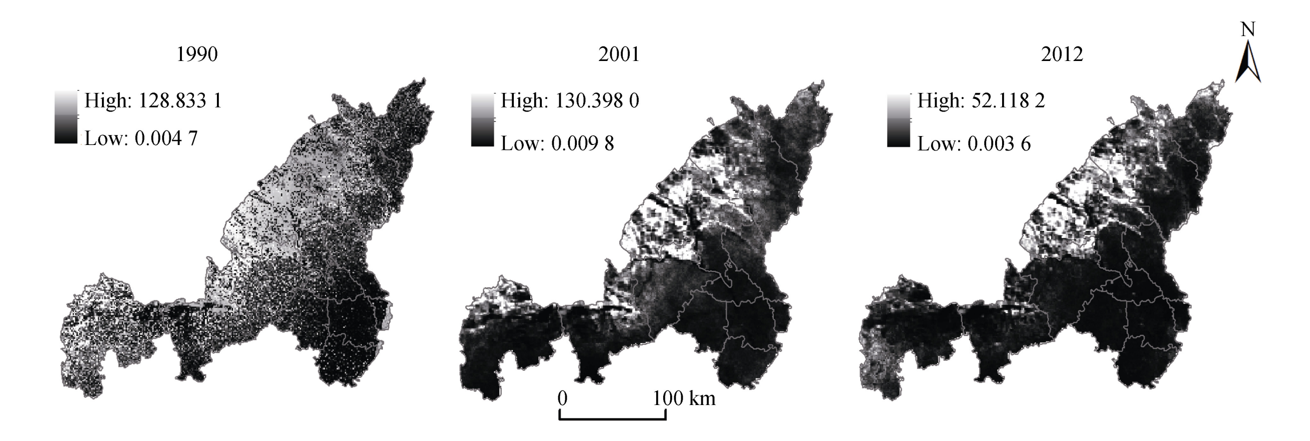



**图 3　1990 年、2001 年和 2012 年榆林市土壤风力侵蚀强度($t·km^{-2}$)分布图**

Fig. 3　Distribution of sand erosion intensities ($t·km^{-2}$) of Yulin City in1990, 2001and 2012

来看，侵蚀严重的地区主要分布在榆林市北部地区，主要由于北部位于风沙草滩区，植被覆盖率低。从侵蚀量变化来看，1990—2012 年整体呈减少趋势，减少量最多为榆阳区，其次为定边县、横山县，其中 1990—2001 年相较于 2001—2012 年侵蚀强度变化明显，其年均变化率约为 2001—2012 年的 1.2 倍。

**3.5 土地生态风险综合评价**

由表 6 可知：1990 年土地生态风险综合指数最大的是府谷县，最小的是绥德县，两者差异明显，最大值约为最小值的 2.8 倍; 2001 年土地生态风险综合指数最大的是佳县，最小的是神木县，最大值约为最小值的 2 倍，有所减小; 2012 年土地生态风险综合指数最大的是清涧县，最小的是神木县，其最大值约为最小值的 1.9 倍，较 1990 年和 2001 年差异有所减小。从各区县变化来看，1990—2001 年，靖边县、榆阳区、府谷县、神木县和清涧县的土地生态风险综合指数减少，说明其生态风险有所改善，其中减少最多的是府谷县，其年递减率约为 4.48%; 其余各县的土地生态风险综合指数均有所增加，说明其生态风险加剧，其中增加最多的是米脂县，其年递增率约为 11.99%。2001—2012 年，府谷县、清涧县和吴堡县的土地生态风险综合指数增加，其中增加最多的是清涧县，其年递增率约为 3.73%，其余各县的土地生态风险综合指数均有所减少，其中减少最多的是横山县，其年递减率约为 3.74%。从总体来看，1990—2012 年，米脂县、绥德县、佳县、子洲县、吴堡县的土地生态风险综合指数增加，其中增加最多的是绥德县，其年递增率约为 4.78%，其余各县的土地生态风险综合指数减少，其中减少最多的是神木县，其年递减率约为 2.50%。

由图 4 可知，1990—2012 年榆林市土地生态风险等级发生了较大变化。1990 年榆林市各区县中前 3 等级的县域共有 5 个，约 42%，主要位于东南部地区，土地生态风险较小，生态环境较为安全。而位于

**表 6 1990 年、2001 年和 2012 年榆林市土地生态风险综合指数及其变化**

Table 6 Land comprehensive risk indexes and changes in different counties (district) in Yulin City in 1990, 2001 and 2012

| 区县 County (district) | 土地生态风险综合指数 Land comprehensive risk index | | | 土地生态风险综合指数变化 Change of land comprehensive risk index | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1990 | 2001 | 2012 | 1990—2001 | 2001—2012 | 1990—2012 |
| 米脂县 Mizhi County | 0.262 8 | 0.609 2 | 0.478 9 | 0.346 4 | −0.130 3 | 0.216 2 |
| 绥德县 Suide County | 0.239 1 | 0.495 7 | 0.490 5 | 0.256 7 | −0.005 2 | 0.251 4 |
| 靖边县 Jingbian County | 0.516 7 | 0.398 3 | 0.290 8 | −0.118 5 | −0.107 5 | −0.226 0 |
| 榆阳区 Yuyang District | 0.561 0 | 0.438 2 | 0.319 6 | −0.122 8 | −0.118 6 | −0.241 4 |
| 佳县 Jiaxian | 0.316 8 | 0.639 0 | 0.447 3 | 0.322 1 | −0.191 6 | 0.130 5 |
| 府谷县 Fugu County | 0.659 9 | 0.334 9 | 0.444 3 | −0.325 1 | 0.109 5 | −0.215 6 |
| 神木县 Shenmu County | 0.600 2 | 0.323 3 | 0.269 7 | −0.276 9 | −0.053 6 | −0.330 5 |
| 定边县 Dingbian County | 0.492 7 | 0.496 5 | 0.340 1 | 0.003 8 | −0.156 3 | −0.152 6 |
| 子洲县 Zizhou County | 0.406 4 | 0.530 5 | 0.427 7 | 0.124 1 | −0.102 8 | 0.021 3 |
| 清涧县 Qingjian County | 0.535 3 | 0.359 5 | 0.506 9 | −0.175 8 | 0.147 4 | −0.028 4 |
| 吴堡县 Wubao County | 0.400 6 | 0.477 5 | 0.498 5 | 0.076 9 | 0.021 1 | 0.097 9 |
| 横山县 Hengshan County | 0.466 2 | 0.593 5 | 0.349 7 | 0.127 3 | −0.243 9 | −0.116 5 |

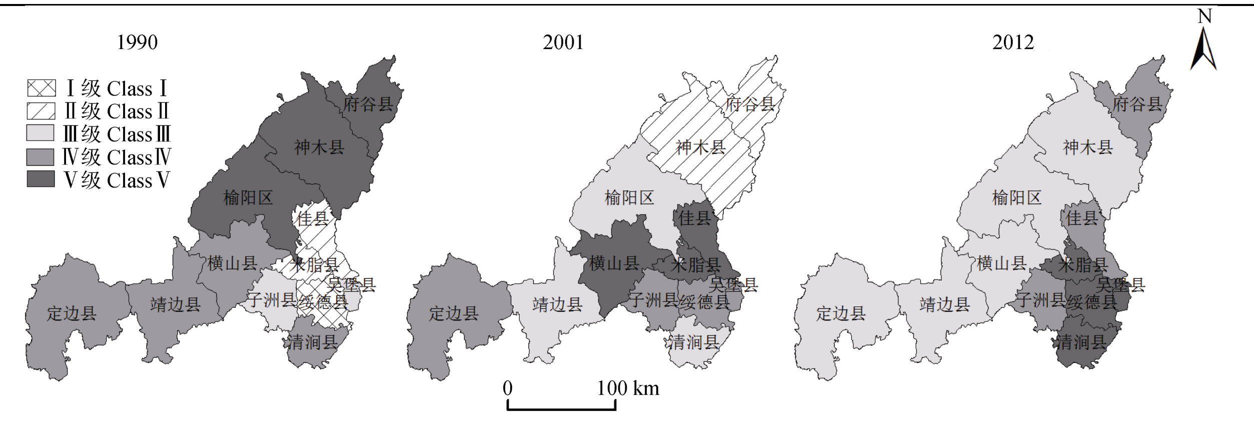



**图 4 1990 年、2001 年和 2012 年榆林市生态风险等级分布**

Fig. 4 Distribution of ecological risk grade of Yulin City in 1990, 2001 and 2012

西部毛乌素沙地区生态风险较大，该区域水土流失严重，植被覆盖度较低，生态环境遭受严重破坏；从 2001 年生态风险等级分布图看，各区县中没有属于Ⅰ级生态风险等级的县，Ⅳ级、Ⅴ级的县域共有 7 个，约占 58%，主要位于榆林市东南部以及西北的定边县，生态环境仍然处于不安全状态；2012 年，全市各区县中没有属于Ⅰ级、Ⅴ级生态风险等级的县，其中前三等级的县域个数共有 8 个，约占 67%，较 1990 年、2001 年相比，生态风险有所减小，但是仍然有 4 个县域生态风险较大，生态风险依然严峻。

## 4 结论

本文选取干旱、土地利用结构、土壤水力侵蚀、风力侵蚀 4 个风险指标，构建区域生态风险综合评价模型，对榆林市 1990—2012 年土地生态风险进行探索性评价，研究结果如下：

1)榆林市各生态风险要素时空差异较大。1990—2012 年间榆林市的降水距平百分率指数均值先减少后增加，大致呈现由南向北递增的趋势，其低值区主要分布在偏东部地区，高值区与低值区差异明显，降水分布不均衡；土地利用结构生态风险区域差异较大且变化明显，呈先增后减的趋势，其中米脂县、清涧县、绥德县、吴堡县的土地利用结构风险指数一直处于增加趋势，需要引起重视，而榆阳区一直处于减少趋势，情况有所改善；土壤水力侵蚀较剧烈的区域主要分布在东部及南部地区，这主要与该区域地形因素有关，其均值呈先增后减的趋势，其中神木县、府谷县、佳县和吴堡县的土壤水力侵蚀强度有所缓和，而清涧县、靖边县和子洲县呈现显著加剧现象；风力侵蚀较严重的区域主要分布在北部地区，侵蚀量最大的是榆阳区，最小的为绥德县、米脂县，其均值一直呈递减趋势，榆阳区减少量最多，其次为定边县、横山县。

2)榆林市土地生态风险等级整体变化较大且区域差异明显。1990 年生态风险等级属于Ⅳ、Ⅴ级的县域有 7 个，生态风险较大，其中风险最大的是府谷县；2001 年生态风险等级属于Ⅳ、Ⅴ级的县域仍然有 7 个，生态风险较大，生态环境处于安全状态，其中风险最大的是佳县；2012 年生态风险有所减缓，但是生态风险等级属于Ⅳ、Ⅴ级的县域仍有 4 个，生态安全依然严峻。从区域差异来看，1990 年榆林市生态风险较大的区域主要位于西北部地区，2001 年生态风险较大的区域主要位于榆林市中部地区和西边的定边县，2012 年生态风险较大的地区主要分布在东南部，生态安全状态整体有所改善，但形势仍旧严峻，需要引起注意。

榆林市属于干旱半干旱区、典型的农牧交错带和能源开发基地，生态环境脆弱，人地矛盾突出，受能源经济产业化和生态恢复过程的双重影响，土地生态安全问题越来越突出。本文从自然灾害、人为活动和生态背景出发，构建了区域尺度的综合生态风险评价指标体系和估算模型，定量评价了 1990—2012 年榆林市土地生态风险的时空变化差异，有针对性地分析了其动态变化趋势。结果表明随着榆林市能源的大量开采和煤矿产业的蓬勃发展，榆林市生态环境遭受了严重的破坏，提高生态环境意识，加强生态文明建设至关重要。下一步研究将围绕土地生态风险的发生机制建立合理的土地生态风险评价指标体系，细化区域研究尺度，提高空间表达的精度，运用主观和客观赋权相结合合理确定指标权重，从评价指标体系的构建、区域研究尺度的细化等方面提高土地生态风险综合评价的科学性，为合理进行土地资源管理规划提供决策。

## 参考文献 References


[1] 徐兰，罗维，周宝同．基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价——以洋河为例[J]．自然资源学报，2015, 30(4): 580–590
Xu L, Luo W, Zhou B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change — a case study of the Yanghe Watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 580–590

[2] 李春燕，南灵．陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J]．中国土地科学，2015, 29(4): 72–81
Li C Y, Nan L. Dynamic evaluation and diagnosis of obstacle factors on land eco-security in Shaanxi Province[J]. China Land Sciences, 2015, 29(4): 72–81

[3] 傅伯杰，陈利顶，马克明．黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例[J]．地理学报，1999, 54(3): 241–246
Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use chang on the regional environment in the Yangjuangou Catchment in the Loess Plateau of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 241–246

[4] Hayes E H, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2004, 10(2): 299–325

[5] Wallack R N, Hope B K. Quantitative consideration of ecosystem characteristics in an ecological risk assessment: A case study[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, 8(7): 1805–1814

[6] Walker R, Landis W G, Brown P. Developing a regional ecological risk assessment: A case study of a Tasmanian Agri-

cultural Catchment[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2001, 7(2): 417–439

[7] 臧淑英, 梁欣, 冯仲科. 黑龙江省大庆市生态风险评价研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S2): 58–62
Zang S Y, Liang X, Feng Z K. Ecological risk assessment of Daqing City in Heilongjiang Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(S2): 58–62

[8] 胡金龙, 王金叶, 郑文俊, 等. 基于土地利用变化的桂林市区生态风险评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3): 84–88
Hu J L, Wang J Y, Zheng W J, et al. Ecological risk assessment for Guilin urban district based on land use change[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(3): 84–88

[9] 莫宏伟, 任志远, 李振国. 陕北榆林市土地生态价值及生态风险动态分析[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 189–192
Mo H W, Ren Z Y, Li Z G. Changes of land ecosystem value and ecological risk in Yulin City of northern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6): 189–192

[10] 马彩虹. 陕西黄土台塬区土地生态风险时空差异性评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 216–220
Ma C H. Assessment on spatiotemporal ecological risk in Loess Highland region of Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 216–220

[11] 贡璐, 鞠强, 潘晓玲. 博斯腾湖区域景观生态风险评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 27–31
Gong L, Ju Q, Pan X L. Ecological landscape risk assessment study of Bosten Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(1): 27–31

[12] 宫继萍, 石培基, 魏伟, 等. 基于土地利用变化的民勤县土地生态风险研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1029–1035
Gong J P, Shi P J, Wei W, et al. Study on land ecological risk in Minqin County based on land-use change[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1029–1035

[13] 肖琳, 田光进. 天津市土地利用生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 469–476
Xiao L, Tian G J. Eco-risk assessment of land use in Tianjin City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 469–476

[14] 张晓媛, 周启刚, 张建军. 基于综合模糊评价的三峡库区屏障带重庆段土地利用生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 262–266
Zhang X Y, Zhou Q G, Zhang J J. Land use ecological risk evaluation of the barrier area of Three Gorges Reservoir Area in Chongqing based on comprehensive fuzzy evaluation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(6): 262–266

[15] 张思锋, 张立, 张一恒. 基于生态梯度风险评价方法的榆林煤炭开采区生态风险评价[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1914–1923
Zhang S F, Zhang L, Zhang Y H. Ecological risk assessment of the Yulin Coal Mining Area based on the PETAR Method[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1914–1923

[16] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 206–211
Liu W X, Luan Z K, Tang H X. Environmental assessment on heavy metal pollution in the sediments of Lean River with potential ecological risk index[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 206–211

[17] 殷浩文. 水环境生态风险评价程序[J]. 上海环境科学, 1995, 14(11): 11–14
Yin H W. Procedure of ecological risk assessment for water environment[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1995, 14(11): 11–14

[18] 程建龙, 陆兆华, 范英宏. 露天煤矿区生态风险评价方法[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2945–2950
Cheng J L, Lu Z H, Fan Y H. Method of ecological risk assessment for opencast mine area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2945–2950

[19] 马海娇, 严登华, 翁白莎, 等. 典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 728–734
Ma H J, Yan D H, Weng B S, et al. Applicability of typical drought indexes in the Luanhe River Basin[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 728–734

[20] 李军龙, 张剑, 张丛, 等. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. 草业科学, 2006, 23(8): 6–11
Li J L, Zhang J, Zhang C, et al. Analyze and compare the spatial interpolation methods for climate factor[J]. Pratacultural Science, 2006, 23(8): 6–11

[21] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington: USDA, 1997: 703

[22] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 56–63
Dong Z B. Establishing statistic model of wind erosion on small watershed basis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998, 18(5): 56–63

[23] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被保持土壤效应评估[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 610–617
Ren Z Y, Liu Y X. Estimating the ecological effect of soil conservation by vegetation in Northwest China[J]. Resources Science, 2013, 35(3): 610–617

[24] 彭羽, 刘雪华, 张爽, 等. 基于综合生态损失度的顺义区生态风险评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(3): 366–369
Peng Y, Liu X H, Zhang S, et al. Ecological risk assessment of the Shunyi District, Beijing based on an analysis of the integrated ecological loss[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2008, 48(3): 366–369

[25] 许学工, 林辉平, 付在毅, 等. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 111–120
Xu X G, Lin H P, Fu Z Y, et al. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1): 111–120

[26] 付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 365–373
Fu Z Y, Xu X G, Lin H P, et al. Regional ecological risk assessment of in the Liaohe River Delta wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(3): 365–373